

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 200434006

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

南海中北部典型海区微型浮游动物
及其对浮游植物的摄食研究

The Microzooplankton and its Grazing on Phytoplankton
in Typical Waters of South China Sea

田 皓 洁

指导教师姓名: 黄邦钦 教授

专 业 名 称: 环境科学

论文提交日期: 2007 年 7 月

论文答辩时间: 2007 年 8 月

学位授予日期: 2007 年 9 月

答辩委员会主席: 杜琦 研究员

评 阅 人: 杜琦 研究员

黄凌风 教 授

2007 年 8 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：
年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月

摘 要

2005 年~2006 年间,应用稀释法和基于高效液相色谱的光合色素分析法,开展了南海中北部典型海区(包括南海东北部海区(台湾海峡南部)、北部珠江口外海区、吕宋西北海区、南海西部越南外海)微型浮游动物的丰度、生物量、类群组成、不同类群浮游植物的生长率及摄食死亡率的现场调查与实验研究。结果表明:

1. 南海东北部上升流区微型浮游动物主要由纤毛虫所组成,尤其是急游虫、拟铃虫、侠盗虫占绝对的优势。微型浮游动物的丰度和生物量随着水深而变化。微型浮游动物水柱积分平均丰度 2005 年夏季(582 个/L)略低于 2006 年夏季(664 个/L)。2005 年夏季平均碳生物量为 $0.98\mu\text{gC/L}$ ($0.16\sim 1.89\mu\text{g C/L}$)亦略低于 2006 年夏季(平均 $1.18\mu\text{g C/L}$, 范围 $0.40\sim 3.65\mu\text{g C/L}$)。2005 年夏季的近岸测站,微型浮游动物的丰度的最大值多在表层;而在 2006 年夏季,微型浮游动物的丰度的最大值却多在叶绿素最大层(DCM 层)。

2. 2006 年冬季,南海中北部不同海区微型浮游动物的分布存在较大的差异。三个断面的丰度变幅为 $25\sim 475$ 个/L,珠江口外陆架海区的丰度要高于越南外海和吕宋西北海区。纤毛虫是该海域微型浮游动物最重要的组成部分,而急游虫是该海域纤毛虫中比重最大的类群,无节幼体和异养甲藻所占总丰度的比重大多在 10%以下。同一测站不同水层的类群组成差异也是很大的,无节幼体在 DCM 层和 100m 层比重明显高于表层。从微型浮游动物的平均生物量来看,三个断面的变幅为 $0.04\sim 0.81\mu\text{gC/L}$,珠江口外陆架海区的生物量要高于越南外海和吕宋西北海区。

3. 2006 年 6 月南海东北部近岸 A1 测站的生长率为 1.34 d^{-1} ,摄食率为 0.79 d^{-1} ,相当于每天摄食浮游植物现存量的 55%和初级生产力的 74%。近岸 B1 测站的生长率为 $0.55\sim 1.28\text{ d}^{-1}$,摄食率为 $0.27\sim 0.85\text{ d}^{-1}$,相当于每天摄食浮游植物现存量的 24~58%和初级生产力的 35~114%。2006 年 12 月南海中北部(珠江口外陆架海区和吕宋西北海区)浮游植物生长率为 $0.83\sim 1.11\text{ d}^{-1}$,摄食率为 $0.53\sim 2.64\text{ d}^{-1}$,相当于每天摄食浮游植物现存量的 41~93%和初级生产力的 73~138%。

4. 微型浮游动物对浮游植物不同类群的摄食压力也是不同的。2006 年 6 月南海东北部近岸 B1 测站的硅藻的生长率为 $0.51\sim 1.17\text{ d}^{-1}$,摄食率为 $0.43\sim 1.27\text{ d}^{-1}$,相当于每天摄食浮游植物现存量的 35~72%和初级生产力的 72~118%。定鞭金藻的生长率为 $0.64\sim 1.81\text{ d}^{-1}$,摄食率为 $0.23\sim 2.22\text{ d}^{-1}$,相当于每天摄食浮游植物现存量的 21~89%

和初级生产力的 36~124%。蓝细菌的生长率为 $0.5 \sim 2.36 \text{ d}^{-1}$, 摄食率为 $0.5 \sim 1.62 \text{ d}^{-1}$, 相当于每天摄食浮游植物现存量的 39~80%和初级生产力的 52~162%。2006 年 12 月珠江口外近岸 A9 测站的甲藻的生长率为 1.07 d^{-1} , 摄食率为 0.81 d^{-1} , 相当于每天摄食浮游植物现存量的 78%和初级生产力的 90%。硅藻的生长率为 0.89 d^{-1} , 摄食率为 0.55 d^{-1} , 相当于每天摄食浮游植物现存量的 31%和初级生产力的 67%。蓝细菌的生长率为 0.96 d^{-1} , 摄食率为 1.3 d^{-1} , 相当于每天摄食浮游植物现存量的 73%和初级生产力的 118%。

5. 2006 年 6 月南海东北部 B1 测站微型浮游动物相对摄食喜好指数 (RPI) 结果表明, 对某类群的浮游植物并不一定具有一致的喜好或避食行为。总体而言, 对于占有浮游植物生物量优势的硅藻, 微型浮游动物总是无摄食选择性或避食, 对定鞭金藻及蓝细菌多喜食。2006 年 12 月南海珠江口外 A9 测站就总体而言, 对于占有浮游植物生物量优势的硅藻, 微型浮游动物是避食的, 对甲藻及蓝细菌多喜食。

关键词: 微型浮游动物 摄食生态 南海典型海区 浮游植物 上升流

Abstract

By using the dilution experiment and HPLC-based pigment analysis, the variations of abundance, biomass, composition of microzooplankton, group-specific phytoplankton growth rates and microzooplankton grazing rates were studied in the central and northern South China Sea from 2005 to 2006. Results are as follows:

1. Microzooplankton was dominated by ciliates, especially *Strombidium* spp., *Tintinnopsis* spp, and *Strobilidium* sp. in north-east of South China Sea. The abundance and biomass varied with depths and years. The depth-integrated mean abundance of microzooplankton was lower in July 2005 (582 ind/L) than that in June 2006 (664 ind/L). The depth-integrated mean biomass of microzooplankton was also lower in July 2005 (0.98 $\mu\text{gC/L}$) than that of June 2006 (1.18 $\mu\text{gC/L}$). For vertical profiles, microzooplankton was dense at the surface waters for all the transects during summer in 2005, while at the DCM (depth of the maximum Chl a) in 2006.

2. The abundance of microzooplankton in winter in central and northern South China Sea, was varied with the different areas. The abundance of three transects ranged from 25 to 475 ind/L, there were higher in the shelf off Zhujiang River estuary than those off Vietnam and northwest Luzon. The ciliates, especially the *Strombidium* spp., were the dominated species of the microzooplankton. The heterotrophic dinoflagellates and copepod nauplius were only account for less than 10% of microzooplankton. The contributions of them for microzooplankton were different at different layers. The biomass of microzooplankton ranged from 0.04~0.81 $\mu\text{g C/L}$, the distribution patterns were similar to that of abundance.

3. The growth rates of phytoplankton at Stn. A1 of northern South China Sea ranged from 1.34 d^{-1} , the microzooplankton grazing rates ranged from 0.79 d^{-1} . The ranges of microzooplankton grazing pressure on phytoplankton standing stock and primary production were 55% and 74% at Stn.A1, respectively. The growth rates of phytoplankton at Stn. B1 ranged from 0.55~1.28 d^{-1} , the microzooplankton grazing rates ranged from 0.27~0.85 d^{-1} . The ranges of microzooplankton grazing pressure on phytoplankton standing stock and primary production were 24~58% and 35~114% at Stn.B1, respectively. While in the winter of South China Sea, the growth rates of phytoplankton ranged from 0.83~1.11 d^{-1} , and the microzooplankton grazing rates ranged from 0.53~2.64 d^{-1} . The ranges of microzooplankton grazing pressure on phytoplankton standing stock and primary production were 41~93% and

73~138%, respectively.

4. The grazing pressure of microzooplankton on different groups were different. The growth rates of diatom at Stn. B1 ranged from $0.51 \sim 1.17 \text{ d}^{-1}$, the microzooplankton grazing rates ranged from $0.43 \sim 1.27 \text{ d}^{-1}$. The ranges of microzooplankton grazing pressure on standing stock and primary production were 35~72% and 72~118% at Stn.B1, respectively. The growth rates of prymnesiophytes at Stn. B1 ranged from $0.64 \sim 1.81 \text{ d}^{-1}$, the microzooplankton grazing rates ranged from $0.23 \sim 2.22 \text{ d}^{-1}$. The ranges of microzooplankton grazing pressure on standing stock and primary production were 21~89% and 36~124%, respectively. The growth rates of cyanobacteria at Stn. B1 ranged from $0.5 \sim 2.36 \text{ d}^{-1}$, the microzooplankton grazing rates ranged from $0.5 \sim 1.62 \text{ d}^{-1}$. The ranges of microzooplankton grazing pressure on standing stock and primary production were 39~80% and 52~162%, respectively. While in the winter of South China Sea, the growth rate of dinoflagellates at Stn.A9 was 1.07 d^{-1} , and the microzooplankton grazing rate was 0.81 d^{-1} . The ranges of microzooplankton grazing pressure on standing stock and primary production were 78% and 90%, respectively. The growth rate of diatoms at Stn.A9 was 0.89 d^{-1} , and the microzooplankton grazing rate was 0.55 d^{-1} . The ranges of microzooplankton grazing pressure on standing stock and primary production were 31% and 67%, respectively. The growth rate of Cyanobacteria at Stn.A9 was 0.96 d^{-1} , and the microzooplankton grazing rate was 1.3 d^{-1} . The ranges of microzooplankton grazing pressure on standing stock and primary production were 73% and 118%, respectively.

5. The results of relative preference index at Stn.B1 showed that there was no preference for a particular phytoplankton groups. In overall, the diatoms, which was always dominated, was avoided grazing or no preference. While the microzooplankton preferentially grazed cyanobacteria and prymnesiophytes. As a whole, microzooplankton avoided diatom, mostly preferentially grazed dinoflagellates and cyanobacteria at Stn. A1 of Zhujiang River estuary in South China Sea in winter of 2006.

Key words: Microzooplankton; South China Sea; Phytoplankton groups; Grazing; Upwelling

缩 写 词

Chl a	Chlorophyll a	叶绿素 a
MICRO	Microphytoplankton	小型浮游植物
NANO	Nanophytoplankton	微型浮游植物
PICO	Picophytoplankton	微微型浮游植物
Fuco	Fucoxanthin	岩藻黄素
Peri	Peridinin	多甲藻素
Phea	Phaeophytin	脱镁叶绿素 a
19-hex	19'-hexanoyloxyfucoxanthin	19-丁酰基氧化岩藻黄素
Diad	Diadinoxanthin	硅甲藻黄素
Diato	Diatoxanthin	硅藻黄素
Zea	Zeaxanthin	玉米黄素
DMF	N,N-dimethylformamide	二甲基甲酰胺
DAD	Photodiode array detector	光电二极管阵列监测器
CHEMTAX	Chemical Taxonomy	
Pi	Chl a biomass removed daily	每日摄食现存量的百分比
Pp	Chl a production grazed daily	每日摄食初级生产的百分比
RPI	Relative preference index	相对喜好指数

目 录

摘 要.....	I
缩 写 词.....	V
第一章 绪论.....	1
第一节 微型浮游动物的生态作用.....	1
第二节 微型浮游动物研究进展.....	2
第三节 稀释法在微型浮游动物摄食生态研究中的应用.....	4
第四节 本研究的目的、内容	7
第二章 研究海区概况及实验材料、方法.....	8
第一节 研究海域简介	8
第二节 材料与方法	8
第三章 微型浮游动物类群组成、丰度及生物量.....	15
第一节 南海东北部海区夏季微型浮游动物类群组成、丰度及生物量.....	15
第二节 南海中北部海区冬季微型浮游动物类群组成、丰度及生物量.....	28
第三节 讨论	37
第四章 微型浮游动物对浮游植物的摄食压力.....	44
第一节 研究海域的环境特征	44
第二节 浮游植物生长率及浮游动物摄食率.....	47
第三节 浮游动物对浮游植物不同类群的摄食压力.....	54
总结、讨论与展望.....	66
总结与比较	66
创新点、不足之处及未来的工作展望.....	69
参 考 文 献.....	72
致 谢.....	81

Contents

Abstract	I
Abbreviation	V
Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Significance of microzooplankton in marine ecosystem.....	1
Section 2 Some progress of microzooplankton ecology study	2
Section 3 Dilution method in microzooplankton grazing ecology.....	4
Section 4 The study focus of this thesis	7
Chapter 2 Main introduction to the study areas and materials, methods.....	8
Section 1 Brief introduction to the study areas	8
Section 2 Materials and methods	8
Chapter 3 Groups composition, abundance, biomass of microzooplankton	15
Section 1 Groups composition, abundance, biomass of microzooplankton in summer in northern-east South China Sea	15
Section 2 Groups composition, abundance, biomass of microzooplankton in winter in South China Sea	28
Section 3 Discussion	37
Chapter 4 Microzooplankton grazing on phytoplankton.....	44
Section 1 Environmental characteristics of the study areas.....	44
Section 2 Growth rates and grazing rates of phytoplankton	47
Section 3 Grazing pressure on different phytoplankton groups	54
Discussion and a prospective look.....	66
Summary and comparison.....	66
Innovation, deficiency and suggestion for future work	69
References	72
Acknowledgement	81

第一章 绪 论

第一节 微型浮游动物的生态作用

微型浮游动物是指体长 20~200 μm 浮游动物, 包括纤毛虫、异养鞭毛虫类和后生动物的幼虫等不同的门类(Capriulo et al.,1991)。在海洋生态环境中, 微型浮游动物是浮游植物的主要摄食者, 对浮游植物的初级生产以及营养盐的再生和循环都具有重要调控作用。微型浮游动物构成了微食物环的重要组成部分, 在微食物环和后生动物间起重要的营养连接作用(Stelfox et al.,1994)。

微型浮游动物一直被认为是较小颗粒的主要消费者, 而这些颗粒无法被中型和大型浮游动物所利用(Lineley et al., 1983; Gifford, 1991)。

在很多海域, 微型浮游动物(主要是原生动物)是浮游植物的主要摄食者(e.g. Verity et al., 1993; Landry et al., 1997; Sherr and Sherr, 2003)。微型浮游动物的摄食是控制浮游植物群落的关键因子(Storm, 2002)。消耗了浮游植物 60%~70%的初级生产量(Calbert and Landry, 2004)。在寡营养海区, 因为较大型摄食者的缺乏, 微型食物环对碳流和能流的贡献大于高生产力海区(Aazm et al., 1983; Sanders et al., 1992; Caron et al., 1995)。

微型浮游植物群落在开放海域有上百种组成, 把它们单纯作为一个生态单位, 很容易忽略不同类群对营养盐以及能流的贡献。水华往往是由生长最快的种群如硅藻这种在地球生化循环贡献很大的种群为优势类群(Smetacek,1999)组成。所以研究微型浮游动物对不同类群的摄食有很大的生态意义。

浮游植物群落结构由微型浮游动物的摄食的下行控制(top-down control)和营养盐的上行控制(bottom-up control)的共同影响。

摄食作用不仅影响海洋浮游植物群落的粒级结构, 还通过他们的选择性摄食影响某些浮游植物的生长速率(Burkill et al.,1987; Storm and Welshmeyer., 1991)。大型浮游植物比较容易受到营养盐缺乏的影响, 在上升流期间, 营养盐的增加, 硅藻会对其产生明显的响应(Latasa et al., 1997)。

浮游动物群落对营养盐的添加有明显响应(Berniger and Wickham, 2005), 而且营养盐的添加会影响其摄食选择(Schluter, 1998), 但普遍认为营养盐的添加不会对微型浮游动物造成伤害(McMaucus,1992)。微型浮游动物的摄食未能有效的控制浮游植物的生长, 被认为是水华产生的主要原因(Irigoien et al., 2005)。

微型浮游动物对浮游植物有明显的摄食选择性, 大多数纤毛虫对硅藻具有避食性,

而某些较大异养甲藻(e.g. *Gyrodinium* spp), 则会对硅藻优先摄食, 甚至在某些海域, 会控制硅藻水华的发生(Archer et al, 1996; Strom and Strom 1996; Leising et al., 2005)。*Emiliania huxleyi* 是海洋中典型的球石藻, 异养甲藻对它有偏好性 (Nejstgaard, 1997)。网纹虫对毒性甲藻具有偏好摄食 (Kamiyama et al., 2005)。轮虫一般被认为对硅藻避食, 因为硅藻的硅质外壳难以食用。轮虫往往是河口区浮游动物的主要种类而硅藻是河口区主要的浮游植物, 所以河口区往往容易发生硅藻赤潮 (Lionard et al., 2005)。Pico-级的浮游植物是浮游植物群落的重要组成部分, 微型浮游动物的摄食是控制其丰度的主要因子(Hall et al., 2004)。Latasa (1997) 报道微型浮游动物对 pelagophytes 具有避食性。

一般微型浮游动物对浮游植物的选择性摄食通常是两个因素作用: 摄食者和被摄食者的形态。浮游植物的刺、骨突和孢囊都一定程度上阻碍了浮游动物对它的摄食压力 (Verity and Smetacek 1996; Liu and Buskey 2000; Gaul and Antia 2001; Storom 2002) 具有运动力的藻 (甲藻), 它的运动力提高了它和捕食者相遇的几率, 从另一方面而言, 它们也可以通过感知而逃脱摄食者的捕食。而浮游植物通过积聚代谢产物来阻碍浮游动物的摄食则是另一种生态策略。

由于粒径选择, 所以微型浮游动物倾向于摄食单个细胞的藻而不是聚集成团形态的藻, 而不像桡足类倾向于摄食合适大小的聚集成团的藻类 (Verity, 2000)。

第二节 微型浮游动物研究进展

微型浮游动物的调查历史非常悠久, 早从 19 世纪末就已经开始 (Beers, 1982), 主要是分类鉴定工作。从 1960 年开始, 人们开展了一系列的微型浮游动物生态学研究, 主要是其群落结构和丰度。近年来, 由于微型浮游动物的研究被列入一些重大海洋研究计划 [如海洋能量联合研究 (JGOFS)、全球海洋真光层研究 (GOEFS)、全球海洋动力学研究与监测 (GLOBEC)], 对其生物量及摄食压力方面的研究取得了很大进步。下面我将从微型浮游动物生物量及丰度研究和微型浮游动物摄食研究这两个研究方向作一简介。

2.1 微型浮游动物生物量和丰度的研究

对于微型浮游动物丰度和生物量研究的报道很多, 但最多的还是对其中的纤毛虫报道的较多, 遍及各大海区。丰度也随各海区的变化而变化, 全球已报道的值从 $3 \sim 2.7 \times 10^3$ 个/升, 生物量从 $0 \sim 144 \mu\text{gC/L}$ (张武昌 & 王荣, 2001)。另外在研究微型浮游动物的

摄食时,一些文献也涉及微型浮游动物的丰度和生物量方面(eg Quevedo and Anadon, 2000)。对微型浮游动物丰度和生物量的研究不断深入,如赤潮、水华期间微型浮游动物生物量的研究(Pierce and Turner,1992; Kamiyama, 1995),法国 Etang de Thau(1997)泻湖微型浮游动物生物多样性。有学者甚至提出了微型浮游动物的生物多样性模型(Rougier and Lam,1995)。

我国对微型浮游动物的研究起步晚,相关研究也较少。关于中国海的微型浮游动物生物量和丰度的只有零星报道(Chiang et al., 2003; Ota and Taniguchi,2003; Zhang et al., 2006;徐奎栋等, 2001;张武昌等, 2004)。

而在这些纷繁的研究中,也发现了诸多的问题。首先是技术的限制,微型浮游动物个体小,身体柔软,在固定浓缩时会收缩甚至解体,影响了计数的精度。而且固定剂的浓度和种类也对计数精度造成影响(Stoecker, 1994)。

其次,计数微型浮游动物是费力、费时又枯燥的工作。研究微型浮游动物需要在显微镜下观察,花费大量的时间,同时固定剂对人体有害。著名生物学家 Haeckel 于 1890 年就说过“我不能想象这么大的工作量不能不对可怜的计数者造成身体和心理的损害”。

另外,从动物的体积换算到生物量的系数变化很大,文献中这个系数的变化范围为 $0.08 \sim 0.36 \text{ pgC}/\mu\text{m}^3$ 。而使用不同的系数也会影响人们对微型浮游动物对碳流贡献的判断。

2.2 微型浮游动物摄食的研究

国外研究微型浮游动物摄食主要从两个方面来考量,即它的上行效应和下行效应。

在此我们仅简述一下关于下行效应的研究。该研究方向主要是探讨微型浮游动物的摄食对初级生产力的归宿存在的主要影响。关于该方面,一些学者开展了大量的研究。Verity 等(2001)发现微型浮游动物的摄食率随深度的增加而减少,对不同粒级叶绿素摄食量随温度的升高而升高(2002),微型浮游动物的摄食是有机碳转化的一个重要通道。Storm 等(1996)在墨西哥湾北部的研究表明,即使在富营养化的近岸水域,微型浮游动物仍是浮游植物死亡的重要原因之一。由于微型浮游动物种类多,摄食机制也多样化,其对浮游植物的捕食影响不仅限于最小的浮游植物细胞。这说明基于个体大小的营养结构模型在沿岸生态系统能量流动方式的解释方面会产生误导。

我国微型浮游动物摄食生态研究起步的比较晚,分别在自然海区,如渤海、黄海、

台湾海峡(孙军等, 2003,2004; Zhang et al., 2002,2006; 曾祥波, 2007)及养殖区水体(沈锦兰等, 2002)进行过稀释实验。近几年来, 国内的工作已不仅限于用叶绿素 a 在稀释培养前后的变化来指示浮游动物的摄食率和浮游植物的生长率, 学者们对微型浮游动物种类组成的研究也越来越细致(张武昌&王荣, 2002; Zhang et al., 2002, 2006; 曾祥波, 2007)。这些研究工作表明: 微型浮游动物对浮游植物有巨大的摄食压力, 对控制浮游植物的现存量及初级生产具有重要的作用。国内目前关于微型浮游动物对浮游植物的摄食生态研究大多还停留在微型浮游动物对浮游植物总体的摄食压力, 对不同类群和不同粒级浮游植物的生长率和被摄食率的研究尚仅有刘媛等和曾祥波在厦门港有过相关实验(曾祥波, 2007; Huang et al., in review)。

而研究中主要用到的方法是稀释法, 我将就此方法在下一节作详细介绍。

第三节 稀释法在微型浮游动物摄食生态研究中的应用

稀释法自 Landry 1982 年建立以来, 已广泛应用于估计浮游植物的生长速率和微型浮游动物的摄食压力。而且还同类群特异性的光合色素(即特征光合色素)方法(Burkell et al., 1987; Latasa et al., 1997; Landry et al., 1998; Obayashi and Tanoue, 2002)和流式细胞技术(Landry et al., 1995; Kuipers and Witte, 2000; Liu et al., 1999)结合起来, 运用的更加广泛。这两种方法都可以提供浮游植物特征类群生长率和被摄食率的信息, 有助于理解摄食选择对浮游植物群落结构的影响。以下就将稀释法作一简单介绍。

3.1 稀释法的产生及原理

3.1.1 稀释法的特点

稀释法是一种可以将浮游植物生长率和被摄食死亡率综合考虑的方法, 因此利用稀释法可以区分生长缓慢的群落和看似生长缓慢, 而事实上, 其内部却在发生着快速的生长代谢和被摄食的浮游植物群落(Landry et al., 1984)。这种方法将过滤海水和现场海水给予混合, 对脆弱的浮游生物来说, 给予了最大程度的保护, 而且操作简单易行。

3.1.2 稀释法的基本原理

稀释法成立的前提建立于三个基本假设: (1) 浮游植物生长速率与其在培养水体中的密度无关。(2) 摄食速率只与水体中浮游动物的密度有关。(3) 浮游植物的生长依指数生长方程 $P_t = P_0 \times e^{(k-g)t}$ 。

由假设 (3), $P_t = P_0 \times e^{(k-g)t}$, 其中, k 为浮游植物生长系数, g 为浮游植物被摄食的

死亡系数, t 为培养时间。方程可表示为: $1/t \ln (P_t/P_0) = k-g$ 。 设稀释梯度为 1: 0, 3: 1, 1: 1, 1: 3 (天然海水: 稀释海水, 稀释海水由 $0.8\mu\text{m}$ 的 GF/F 膜过滤得到)。可以得到以下的方程:

$$1/t \ln (P_t/P_0) = k-g;$$

$$1/t \ln (P_t/P_0) = k-0.75g;$$

$$1/t \ln (P_t/P_0) = k-0.5g;$$

$$1/t \ln (P_t/P_0) = k-0.25g。$$

任意两个方程联立求解, 均可求得 k 、 g 值。若将浮游植物净生长速率, 即 $1/t \ln (P_t/P_0)$ 与稀释因子 D_i (天然海水占总的混合海水的比例) 作线性回归 (每个方程中的系数就是 D_i), 就可以得到 k 、 g 两个系数的置信区间。 y 轴截距 k 为浮游植物生长速率的真实值, 也即不存在浮游动物摄食时的生长速率, 负的斜率 g 为浮游动物的摄食压力。

3.1.3 对于稀释法假设的讨论

稀释实验简便易行, 但也存在一定问题。即关键的三个基本假设不一定总是成立。对于第一点假设, 海水中任何对浮游植物生长必要的溶解成分在培养期中都可能因为被消耗而成为制约因子, 这是因为在浮游植物密度大的混合海水中, 它们会被消耗完, 因此, 回归方程中的负斜率就被夸大了。对于第二点假设, 在非常高的浮游植物浓度下, 摄食群体会出现饱和摄食, 从而低估浮游动物的摄食压力。而在较稀释的样品中会因为浮游植物密度太低而产生阈值摄食行为, 这样又会高估浮游动物的摄食压力。

3.2. 稀释法的发展

稀释法在假设上具不确定性, 但它使我们更加方便的估算微型浮游动物摄食强度及浮游植物生长率。为了使该方法在应用时具有更大的可信度, 学者们做了大量的完善工作。

3.2.1 稀释法的应用和完善

稀释法自提出以来, 被广泛的运用于各大海区(Landry et al., 2004; Boissonneault et al., 2001; Sommer et al., 2002; Berniger and Wickham, 2005), 尽管其中有些学者对该方法提出了异议(Dolan and Mckee, 2005), 认为可能对其中的碳消耗存在着高估的情况。但 Landry 认为这是因为 Dolan 等人比较的海域过少(Landry and Cabler, 2005)。

但是不可否认, 在稀释法的应用过程中, 还是发现了一些问题。比如用一般意义上孔径最小的膜过滤的海水, 仍然含有生物体(Li and Dickie, 1985; Li, 1990)。随着培养时

间的延长,它们会快速生长,从而会引起一定的误差。从这一点出发,似乎增大 D_i 值有利于减小实验误差,因为在 D_i 值较大的培养水体中,这一部分本该滞留在滤膜上的生物只占相对小的总生物量,因此误差也小。但是又有人提出在 D_i 值较小的回归段,浮游植物净生长速率与 D_i 值才表现出线性相关 (Gallegos, 1989; Evans and Paranjape, 1992), 即稀释法的基本假设仅在回归曲线的某些截段成立。而 Morgis (2006) 则提出微型浮游动物的滤清率可能是影响回归曲线非线性的关键因子。

稀释法的局限性源于其不一定成立的三个假设。尤其是“摄食强度与稀释因子成正比”的假设,当摄食者的清滤率在培养期间随着浮游植物的浓度变化而显著变化时,是显然不成立的。针对此现象, Landry 等在 1995 年又提出了“改进的稀释法”。该方法用流式细胞仪测定荧光标记细菌的消失速率作为“相对摄食率”代替 D_i 值。这样,就使回归方法由原来的“净生长率 Vs 稀释因子”变为“净生长率 Vs 相对摄食速率”。该方法增加了稀释法的可信度,有助于对生长率和摄食率做出客观的估计。

3.2.2 稀释法的研究现状

近十几年来,稀释法广泛应用到海洋微型生物生态动力学的研究中,已成为海洋生态动力学研究的一个重要手段。比起过去,该方法的成熟性表现在对稀释培养的条件加以限制,尽可能地使之符合三个基本假设。其中包括:在培养水体中添加营养盐,使浮游植物的生长不受营养盐的限制。对于生物量高、可能使浮游动物的摄食出现饱和的水体,则在回归处理中,只对稀释度高的样品得到的数据进行回归,确保数据来源的可靠。下面将该研究的现状作一简介:

一,在考察微型浮游动物摄食压力的同时,需要对浮游植物生长的营养状况进行了解。一些研究通过添加营养盐后的浮游植物生长速率与未添加营养盐的生长速率比值来反映浮游植物生长受营养盐限制的情况 (Ayukai, 1996; Liu et al., 1999; Suzuki et al., 2002)。因为添加营养盐后的水体环境与天然海水不同,所以在实验中建立一个天然海水的对照样(不加营养盐),分别测定对照样和稀释样中浮游植物生长率 (k)。最后通过 k_0/k_n (对照样/稀释样) 的值来判断浮游植物生长受到营养盐限制的程度。此外,还有研究通过添加营养盐与微量元素,观测浮游植物的生长 (Landry et al., 2000; Renate et al., 1997)。

二,改变培养时间,并在培养期间连续取样,以追踪 k 、 g 值的周日乃至更长时间尺度上的变化。有报道称 (Tsuda and Kawaguchi, 1997), 在南大洋位置极为接近的三个站点的表层水中,浮游植物生长速率变化很大,且与微型浮游动物的摄食强度变化非常一

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库